水声通信技术进展

朱　敏* 　武岩波

1 中国科学院声学研究所　北京　100190
2 北京市海洋声学装备工程技术研究中心　北京　100190

摘要　水声通信技术是海洋领域中具有重要地位的核心技术，对水下观测、作业和军事活动具有重要的支撑作用。水声信道的复杂性使得水声通信的通信速率、通信距离和通信的稳定性受到极大限制。非相干通信技术对信道适应性更强，目前得到广泛应用；相干通信技术通信速率比非相干通信技术提高一个数量级，但受信道限制更大，目前还在发展完善；为了进一步改善通信的性能，正在不断完善自适应均衡算法、纠错编码算法等，也在开展时反技术、多输入多输出技术等新方法的研究。国内中国科学院声学研究所等研究机构开展了水声通信与组网技术各个方面的理论研究，样机研制和湖海试验发展迅速。特别是近15年来，国家加大了对水声通信和组网技术的支持力度，缩短了我国和国外的技术差距。但就总体而言，我国在理论研究和产品两方面仍滞后于美国等国家5年左右，需要继续大力发展水声通信算法研究、网络协议研究、试验与应用研究、换能器和数字系统等硬件的研制、水声通信产品开发等方面。

关键词　水声通信，水声通信网，发展现状

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.2019.03.006

今天是信息的时代，网络的时代。不断升级换代的网络技术把全球联结在一起，催生出了电子商务、智能家居、远程医疗、云计算、云存储等新型的产业，而万物互联将深刻地改变每个人的生活和工作方式。支撑这些的是快速发展的通信技术，以5G为代表的无线通信技术可以达到10 Gbps，低廉的成本使得通信网络可以覆盖全球。

但在海洋中，水下通信却面临着巨大的障碍。水下电缆、光缆布设困难、成本高昂、易被破坏等难题，使得水下有线通信的应用范围非常有限。除极低频率外，电磁波在水中的衰减很快，穿透能力较强的超长波也仅能穿透水面约100米左右；光波在水中受吸收和散射影响，只能进行短距离传输，传输最远的蓝绿激光也只能实现水下几百米的传输。由于声波可以在水中传播比较远的距离，水声通信是水下无线信息传输的主要手段，但也面临可用带宽窄、信道复杂多变等难题。

随着人类在海洋中的活动越来越频繁，需要在水

*通讯作者
资助项目：国家重点研发计划项目（2016YFC0300300），国家自然科学基金面上项目（61471351）
修改稿收到日期：2019年3月1日

下传输信息的应用需求也越来越多，水声通信技术的应用也越来越广泛，在科学考察、海洋工程建设、海底矿产资源调查与开发以及军事领域等方面水声通信技术都有着广泛的应用，这些应用也对水声通信的速率和可靠性提出了更高的要求。

在科学考察活动中，以前放置在海底的海洋考察仪器都是将采集的数据存储在仪器内，到预定的日期由母船去回收，取出数据后再重新布放下去。这样周期长、费用高，而且经常出现回收失败导致无法弥补的数据缺失。如果应用水声通信技术，则可以将数据传输至水面，不必回收海洋考察仪器，降低了风险和费用。如果水面有长期值守的浮标，那么就可以实现数据的实时回传。

在海上石油开采工业中，水声通信设备被广泛用于海洋石油平台的环境参数监测、立管和局部管路的振动，以及姿态监测、一些阀门的控制等。在无缆自治水下机器人（AUV）和无人水下机器人（UUV）等水下潜器中，水声通信机广泛用于遥控、遥测、数据回传、协同作业等。对深海载人潜水器来说，水声通信设备更是其关键设备之一，深海考察是一项具有危险性的活动，保障潜水器中的科学家的生命安全是设计深海载人潜水器要考虑的首要问题。与水面支持、控制母船的及时通信联络可以极大提高载人潜水器中的科学家处理突发事件的能力，对保障其生命安全起着不可替代的作用。水声通信系统还可以实时传输载人潜水器采集的数据信息，供水面科学家实时分析，以便及时调整使命。实时的通信还有助于潜水器中的科学家保持平静心态，顺利完成科研任务。

在军事上，水声通信是水面舰船和水下的载体（潜艇和水下传感器等）间实现双向信息传输最为有效的手段，如潜艇与指挥舰之间的联系等。美国、法国、英国等国家的海军都有很多这方面的研究计划。在用于侦察、救捞、布雷与扫雷的水下机器人中，水声通信也是关键技术之一。正是由于水声通信技术在军事上的巨大应用价值，水声通信被列为高度敏感的技术，美国一直限制其高性能水声通信产品对中国的出口。

本文主要介绍非军事领域的水声通信技术进展。

1 水声通信技术的难点

水声通信技术在发送端把信息添加到声波中，让声波把信息带到远方的接收端去。声波会穿透海水，被海水吸收、折射、散射，被海底和海面反射[1]，被噪声干扰，声波从发送端到接收端所经历的环境称之为水声信道。信道对水声通信的影响有以下 5 点。

（1）吸收衰减。海水对声波的吸收衰减是随频率指数上升的，这一方面导致水声通信的带宽很窄，通信速率低；另一方面导致频率越高通信距离越短。1 kHz 的声波可以传几十甚至上百公里，10 kHz 的声波可以传十来公里，100 kHz 的只能传几百米，1 MHz 的就只能传几米。通信速率和通信距离基本上呈现反比的关系，为了对比不同工作频率的通信机的性能，一般用通信速率和通信距离的乘积来表征一个通信系统的性能。

（2）多途传播。发射端发射的声波会沿着多条不同的路径传播，接收端将先后收到同一个信号经过不同路径后到达的多个信号，这种现象被称为“多途传播”，简称“多途”。水声信道决定了多途传播路径的数目以及各到达信号的强度及时延，在深海信道时延可达几秒，在浅海信道一般是毫秒量级，长的可达百毫秒量级。多途一方面会造成信号拖尾，前面的信号干扰后面的信号——信号传输速率越高，单个符号的持续时间越短，相同多途时延扩展影响到的符号数目越多，接收信号质量越差，系统性能越差；另一方面，多途还会造成某些频率的信号被增强而另一些频率的信号被削弱，这种现象被称为频率选择性衰落，这种强弱变化还和空间位置有关系，称为空间选择性衰落。

(3) 多普勒频移。当水声通信的发射端与接收端做相对运动时，接收信号的频率将会发生变化，这种现象称为多普勒效应，而频率的变化称为多普勒频移。除了通信设备相对运动之外，起伏的海面对声波的反射、水中湍流对声波的折射等现象也会引入多普勒频移，使得接收端的多普勒偏离变化不是单一的，而是一种不连续的分布，这被称为多普勒频移扩散。由于声波的传播速度低，使得同样运动速度时水声通信中多普勒效应比无线电通信中严重10万倍。

(4) 时变性。水声信道具有时变性，因此水声信道被称为时变的时延-多普勒频移双扩散信道。由于声波的传播速度低、通信的符号周期较长，使得信道的时变性对通信的影响更加明显，对时延扩散和多普勒频移扩散的处理变得更加困难。

(5) 环境噪声。天然的和人工因素造成的环境噪声对水声通信有严重的影响。

水声通信信道是非常复杂多变的时延-多普勒频移双扩散信道，带宽窄、传播速度慢、噪声严重，声波在信道中传输时发生各种失真，到接收端的时候声波信号已经面目全非了。如何在发送端往声波中添加更多的信息并且能够在接收端从变形的声波中准确无误地恢复出发送端添加的信息是水声通信技术的核心，主要技术包括调制解调和纠错技术等。

2 国外水声通信技术的发展

最早的水声通信系统是采用模拟技术的水声电话，二战期间就已在潜艇上装备，目前仍广泛应用于潜艇以及潜水员的通话。但其明显的缺点是功能相对单一，即主要传输语音，也有的在语音基础上增加了低速的数传功能。

(1) 非相干水声通信技术。首先发展起来的数字式水声通信系统采用非相干水声通信技术。非相干水声通信技术用不同频率信号的能量变化或其组合来传输信息。当前多采用多频移键控信号（MFSK）加编码以及保护间隔和循环前缀的技术克服多途引起的符号间干扰和频率选择性衰落，其带宽利用率较低，传输速率一般为数百 bits/s。这种技术在20世纪90年代中期已发展得比较完善。代表性产品是美国Datasonics公司（后被Benthos公司收购）的ATM系列水声通信机。由于其鲁棒性好，得到了广泛应用。

(2) 相干水声通信技术。该技术是利用信号的相位变化来传输信息，带宽利用率比非相干技术提高了一个数量级。由于声波信号失真严重，相位的畸变比频率和幅度要严重得多。直到自适应技术发展起来，能够自动修正信道的影响，相干水声通信技术才成为可能。与水声信道特性相匹配的自适应均衡器技术是相干水声通信的核心技术。20世纪90年代美国Scripps海洋研究所率先发展出了单载波相干通信技术[2]，采用多相移键控信号（MPSK）、空间分集、自适应均衡器、纠错编码和多普勒补偿等技术。目前单载波通信技术已经得到了长足的发展，在一些商业产品上已经支持单载波通信模式，用于高速传输。但其成熟度还比不上非相干通信技术，对信道条件的依赖性相对较高，技术还在继续发展完善中。

(3) 正交频分复用（OFDM）技术。这是一种多载波的相干通信技术，频带利用效率高，在无线电通信中得到了广泛的应用。从20世纪90年代中后期开始，才逐渐有人开始将OFDM技术应用于水下通信的研究。由于水声信道的复杂性，OFDM技术在水下遇到了很多问题，目前距离实用还有一定距离。

(4) 其他技术。美国Scripps海洋研究所从1999年起进行了时反水声通信技术的研究[3]。在2000年前后，美国麻省理工学院等单位开展了基于空间调制的多输入多输出（MIMO）水声通信技术研究[4]。这些技术的思路都是利用了声波在水声信道中的多途传播特性来实现高速、可靠、多用户通信。目前这些技术还处于原理性研究阶段，距离实用还有较大差距。

在点对点水声通信技术发展的基础上，20 世纪 90 年代起美国①、欧盟等国家和地区开展了水声通信网技术研究，目的是实现水下设备间的互联互通，以用于海洋观测、水下侦查预警、潜艇协同作战等方面。受水声通信速率和距离之间矛盾的限制，目前还主要在科学研究方面有所应用，没有军事上实战应用的报道。

3 国内水声通信技术进展

3.1 国内水声通信技术的起步

20 世纪 70 年代，中国船舶重工集团公司第 715 所（以下简称“715 所”）和 612 厂就共同开发了我国的第一代模拟通信声呐。我国是在 20 世纪 80 年代中期开展数字水声通信技术研究的，但当时国家的支持力度不大，只有一些零星的原理性的研究。

20 世纪 90 年代初，我国“863”计划访问团在法国考察，作为中方团长的中国科学院声学研究所（以下简称“声学所”）老所长汪德昭院士在和法方讨论时，法国人明确表示“什么都能谈，就是水声通信不能谈!”。此事对汪院士触动很大。汪院士回国后，大力推动国内开展水声通信技术的研究，促成了国家在“863”计划自动化领域智能机器人主题中立项予以支持（当时“863”计划还没有设立海洋领域）。

“七五”计划期间“863”自动化领域智能机器人主题重点项目“探索者号 1 000 米水下机器人”中支持了非相干水声通信机的研制，声学所朱维庆团队研制了水声通信机试验装置，中心频率 17.5 kHz，工作带宽 5 kHz，传输速率 0.6 kbps。进行了水池和海上试验，在浅水 2.5 km 距离接收信号和声像声呐的记录，位误差概率为 10^{-4}，试验结果良好，与当时美国 Woods Hole 海洋研究所的结果相近。在此基础上该团队于“八五”计划期间研制出了与美国的 ATM850 水声通信机性能相近的非相干水声通信机。

“八五”计划期间国家“863”计划自动化领域智能机器人主题于 1995 年支持了“空间分集相关-自适应均衡-纠错编码在水声通信技术中的应用”（863-512-26-02）课题，1998 年支持了“用于作业型 AUV 高速水声通信自适应快速信号处理方法关键技术”（863-512-9804-04）课题，研究水声相干通信技术。朱维庆团队提出了快速自优化最小均方算法（FOLMS）和快速自最佳最小均方相位估计算法（FOLMSPE）联合工作的自最佳自适应判决反馈均衡器技术，样机中心频率 17.5 kHz，工作带宽 5 kHz，在湖试中作用距离 4 km，传输速率 10 kbps，位误码率为 10^{-4}—10^{-5}，达到了当时国际先进水平。

2000 年声学所在中国科学院知识创新工程二期中对水声相干通信技术研究给予了支持，主要研究水下载体运动引起的多普勒频移的补偿技术。通过研究，提出了多普勒频移估计和补偿技术，通过多普勒频移粗补偿和自适应均衡器相位跟踪相结合，很好地解决了多普勒频移的问题。

3.2 载人潜水器水声通信系统的跨越发展

在上述工作的基础上，2002 年在国家“十五”计划期间的“863”重大专项“7 000 米载人潜水器”中声学系统的论证过程中，声学所提出了采用相干通信技术高速传输图像的和采用非相干通信技术实现中速传输传感器等数据的中程高速数字化水声通信技术方案，实现在 8—10 km 距离内以最高 10 kbits/s 的速率传输数据、语音和图像，目标是在研制完成时仍具有国际先进水平。在研制过程中完善和发展了空间分集-多普勒频移补偿-自最佳自适应判决反馈均衡器技术，研究并应用了 Turbo-TCM 码编解码技术、基于小波变换的抗误码图像传输技术、低码率的语音编解码技术等[5]。在经过 2009 年“蛟龙”号载人潜水器第

① Rice J, Creber B, Fletcher C, etc. Evolution of seaweb underwater acoustic networking. IEEE Oceans 2000 MTS/IEEE Conference, 2000: 2007-2018.

一次海试后，声学所对海试中暴露出来的问题进行了改进，重点是克服了母船噪声的干扰，提高了设备的可靠性和操作便利性；在后续的海试中水声通信效果良好，母船和潜水器之间信息交流顺畅，语音清晰，传回了大量数据和水下作业照片，综合性能优于同类国际载人潜水器水声通信系统[6]。2012 年 6 月 24 日，“蛟龙”号在 7 000 米深的海底通过水声通信系统与在太空的“天宫一号”航天员实现了海天对话，这在国际上也是一次创举（图 1）。



图 1 “蛟龙”号通过水声通信机与“天宫一号”进行海天对话

在“蛟龙”号海试与 2013 年以来的试验性应用中，“蛟龙”号成功下潜了 150 多次，水声通信系统实现了母船对潜水器的实时监控，保障了母船与潜水器之间顺畅的通信联系，传回了大量现场照片（图 2），为“蛟龙”号的成功下潜发挥了关键作用。

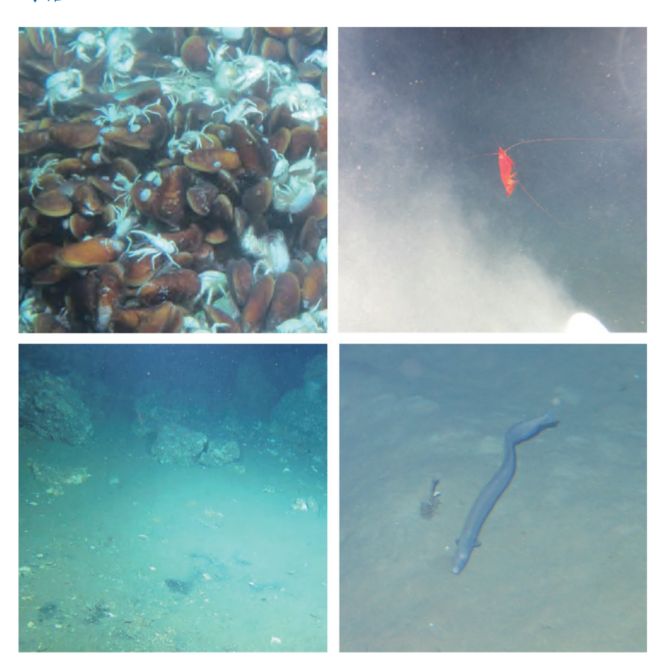


图 2 “蛟龙”号通过水声通信机传回的部分海底照片

在“蛟龙”号水声通信系统的基础上，声学所又为“深海勇士”号 4 500 米载人潜水器研制了水声通信系统，其最核心的改进在于改进了相干和非相干通信算法以及纠错编码技术，降低了对信噪比的要求，使得在自噪声较高的母船上使用船载换能器成为可能[7]。海试结果表明，在 4 500 米海试中，采用船载换能器的水声通信系统可靠实现了全部通信功能，得到了专家组的高度评价。

当前声学所正在为全海深载人潜水器研制水声通信系统，需要克服的主要问题是需要在通信功能和通信速率指标不变的前提下把通信距离由“蛟龙”号的 7 km 延拓到 12 km。2018 年底，声学所已经完成了设备研制，2019 年将开展海试验证。研制完成后该套水声通信系统将是国际上最先进的水声通信系统之一。

3.3 水声通信网技术发展

在水声通信网技术方面，国内很多单位都开展了跟踪研究，在网络协议设计、仿真分析方面做得比较多，受经费支持限制，海试研究一直比较薄弱。“十一五”计划期间的“863”重点项目“水声通信网络节点及组网关键技术”是我国当时支持力度最大的水声通信网项目，由声学所、哈尔滨工程大学、715 所、浙江大学等单位联合承担。该项目开展了面向不同应用的水声通信网络协议仿真研究，并主要针对海洋调查应用制定完成了一套水声通信网络协议规范，利用项目组研制的半物理仿真平台完成了实验室测试后，在海南近海开展了持续 45 天的海上试验（图 3），实现了对海区水温、压力和流场的连续、实时观测（图 4），验证了水声通信节点、网络协议的功能和性能，展示了水声通信网在组网观测方面的

能力[8]。

3.4 国内各单位的研究工作

在“863”计划、军方、国家自然科学基金委员会（以下简称“基金委”）等支持下，哈尔滨工程大学、715所、厦门大学、浙江大学、西北工业大学、东南大学等单位均开展了扩频通信、非相干通信、单载波相干通信、多载波相干通信、时反技术、MIMO技术、纠错编码技术、水声通信网络协议等水声通信领域各方面的研究工作，并开展了样机研制和湖海试验。

3.5 水声通信机产品化

在产品化方面，国内尚未形成得到国内用户广泛认可的水声通信产品。声学所研制了ACN系列水声通信机产品，在AUV遥测遥控、科研教学等方面有少量应用；厦门大学研制AMLink系列水声Modem在国内多家科研机构、海洋工程单位得到应用；715所也在做产品化方面的工作；其他单位的水声通信产品多是科研样机。

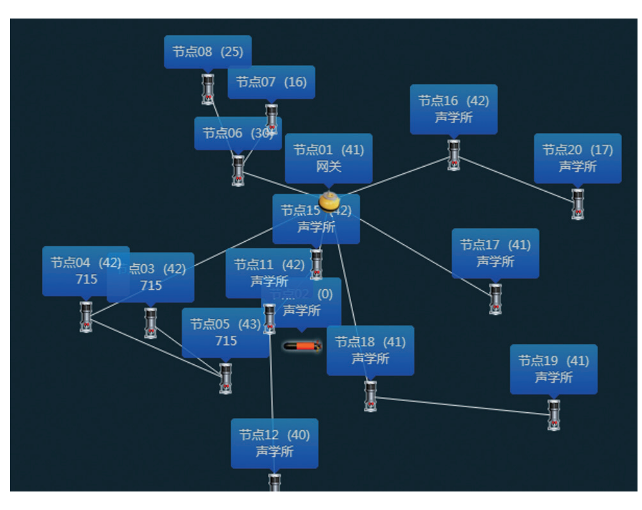


图3 水声通信海上试验网络拓扑结构图(连线表示通信链路)

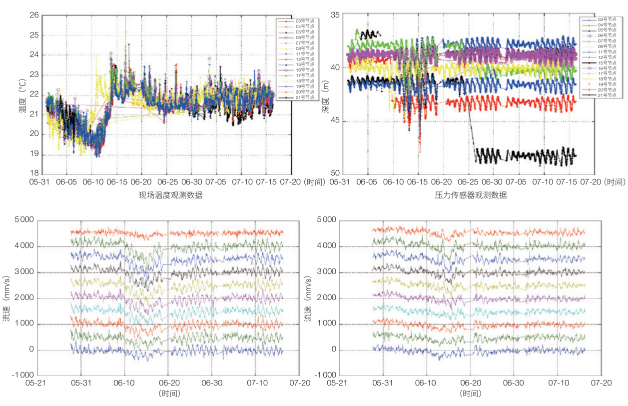


图4 通过水声通信网回传的45天连续观测数据

4 结束语

水声通信与组网技术是海洋领域中具有重要地位的核心技术，对未来水下观测、作业和军事活动具有重要的支撑作用。国内声学所、715所、哈尔滨工程大学、浙江大学、厦门大学、西北工业大学、东南大学等研究单位在“863”计划、军方、基金委等支持下开展了水声通信与组网技术各个方面的理论研究、样机研制和湖海试验，发展迅速。特别是近15年来，国家加大了对水声通信和组网技术的支持力度，缩短了我国和国外的技术差距。但就总体而言，我国在理论研究和产品两方面仍滞后于美国等国家5年左右，需要继续大力发展水声通信算法研究、网络协议研究、试验与应用研究、换能器和数字系统等硬件的研制、水声通信产品开发等方面。

参考文献

1 R. J. 尤立克. 水声原理（第3版）. 洪申, 译. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1993.

2 Stojanovic M, Catipovic J, Proakis J G. Adaptive multichannel combining and equalization for underwater acoustic communications. JASA, 1993, 94(3): 1621-1631.

3 Song H C. An overview of underwater time-reversal communication. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2016, 41(3): 644-55.

4 Pelekanakis K, Baggeroer A B. Exploiting Space-time-frequency diversity with MIMO-OFDM for underwater acoustic communications. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2011, 36(4): 502-513.

5 朱维庆, 朱敏, 王军伟, 等. 水声高速图像传输信号处理方法. 声学学报, 2007, 32(5): 385-397.

6 朱维庆, 朱敏, 武岩波, 等. 载人潜水器“蛟龙”号的水声通信信号处理. 声学学报, 2012, 37(6): 565-573.

7 Wu Y B, Zhu M, Liang T, et al. Shipborne underwater acoustic communication system and sea trials with submersible Shenhai Yongshi. China Ocean Engineering, 2018, 32(6): 746-754.

8 朱敏. 水声通信网络节点及组网关键技术. 中国科技成果, 2015, (5): 20-21.

Development of Underwater Acoustic Communication Technology

ZHU Min* WU Yanbo

(1 Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2 Beijing Engineering Technology Research Center of Ocean Acoustic Equipment, Beijing 100190, China)

Abstract Underwater acoustic communication is a key technology in the field of underwater activities including underwater surveillance, underwater operations, and military actions. The complexity of the underwater communication channel strongly restricts underwater communication speed, distance, and reliability. Incoherent communication is more robust to channel variation and is wildly used today. Coherent communication is ten times faster than incoherent communication. But it is more vulnerable to channel variation. It is still under developing. To further improve underwater communication performance, the community is keeping improving adaptive equalization algorithms, error correction coding, etc., and developing new technologies like time reversal technology, MIMO technology, etc. Many Chinese organizations joined in the development of underwater communication and networking technology. They carried out theoretical researching, prototypes building, lake and sea trials, and achieved much progress. Especially in last fifteen years, with enhanced support from Chinese government funding, China shortened the gap in underwater communication and networking technology between the leading counties in the world but still at least five years behind them in both theory research and commercial product development. China needs to keep working hard in all fields of underwater communication including algorithm research, networking protocol design, more lake and sea trials, more application, hardware developing and commercial products developing.

Keywords underwater acoustic communication, underwater acoustic networking, development status



朱 敏 中国科学院声学研究所二级研究员、博士生导师，海洋声学技术中心暨北京市海洋声学装备工程技术研究中心主任，科技部重点领域创新团队“水声通信创新团队”负责人，“万人计划”科技领军人才。长期从事海洋声学技术研究和仪器研发，主要研究方向包括水声通信与组网技术、声学测速技术、声学探测技术和声学系统集成。担任“蛟龙”号载人潜水器副总设计师、“863”重点项目“水声通信网络节点及组网关键技术”、重点研发计划“全海深潜水器声学技术研究与装备研制”等项目负责人。获国家科学技术进步奖一等奖、国家技术发明奖二等奖、全国五一劳动奖章、中国科学院十大杰出青年等奖励和荣誉。E-mail: zhumin@mail.ioa.ac.cn

*Corresponding author

ZHU Min Professor, received his bachelor degree in electronic engineering from University of Science and Technology of China in 1994, master and doctor degrees in signal and information processing from the Graduate University of Chinese Academy of Sciences in 2001 and 2006 respectively. He is the Director of Ocean Acoustic Technology Laboratory of IACAS (Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences), a doctor director, and the leader of Underwater Acoustic Communication Innovation Team in key areas of Chinese Ministry of Science and Technology. His research fields include underwater acoustic communication, acoustic Doppler velocity measurement, acoustic instruments development and acoustic system integration for underwater platform. He is one of the deputy chief designers of deep sea manned submersible "JIAOLONG" and the principal investigator of the high technology research project of Acoustic Technologies Research and Instruments Development for Full-depth Vehicle and the project of Underwater Acoustic Communication Nodes and Networking Technology Research. He won Second Prize of National Invention Award in 2003, First Prize of National Science and Technology Advancement Award in 2018, special government allowance, and eleventh "Ten Outstanding Young Scientists" of Chinese Academy of Sciences. He is also supported by National Ten Thousand Talents Program.

E-mail: zhumin@mail.ioa.ac.cn

■责任编辑：文彦杰

参考文献（双语版）

1 R. J. 尤立克. 水声原理（第3版）. 洪申, 译. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1993.

Urick R J. Principles of Underwater Sound (3rd ed.). Translated by Hong S. Harbin: Harbin Engineering University Press, 1993. (in Chinese)

2 Stojanovic M, Catipovic J, Proakis J G. Adaptive multichannel combining and equalization for underwater acoustic communications. The Journal of the Acoustical Society of America, 1993, 94(3): 1621-1631.

3 Song H C. An overview of underwater time-reversal communication. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2016, 41(3): 644-655.

4 Pelekanakis K, Baggeroer A B. Exploiting space-time-frequency diversity with MIMO-OFDM for underwater acoustic communications. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2011, 36(4): 502-513.

5 朱维庆, 朱敏, 王军伟, 等. 水声高速图像传输信号处理方法. 声学学报（中文版）, 2007, 32(5): 385-397.

Zhu W Q, Zhu M, Wang J W, et al. Signal processing for high speed underwater acoustic transmission of image. Acta Acustica, 2007, 32(5): 385-397. (in Chinese)

6 朱维庆, 朱敏, 武岩波, 等. 载人潜水器"蛟龙"号的水声通信信号处理. 声学学报, 2012, 37(6): 565-573.

Zhu W Q, Zhu M, Wu Y B, et al. Signal processing in underwater acoustic communication system for manned deep submersible "Jiaolong". Acta Acustica, 2012, 37(6): 565-573. (in Chinese)

7 Wu Y B, Zhu M, Liang T, et al. Shipborne underwater acoustic communication system and sea trials with submersible Shenhai Yongshi. China Ocean Engineering, 2018, 32(6): 746-754.

8 朱敏. 水声通信网络节点及组网关键技术. 中国科技成果, 2015, (5): 20-21.

Zhu M. Underwater acoustic communication network nodes and key networking technologies. China Science and Technology Achievements, 2015, (5): 20-21. (in Chinese)